

狭小空間での携帯電話通話における  
聴き取りにくさと単語了解度の評価

関西大学 環境都市工学部 建築学科

建築環境工学第 研究室

建 11-0042 鈴木 裕太

指導教員 豊田 政弘 准教授

# 目次

第1章	はじめに	2
1.1	研究背景	2
1.2	既往研究	3
1.3	研究目的	5
第2章	携帯電話音声処理	6
第3章	実験方法	8
3.1	実験用音声データ条件	8
3.1.1	実験条件	8
3.1.2	実験用刺激音声データ作成手順	9
3.2	実験手順	12
第4章	実験結果	15
4.1	実験回答結果	15
4.2	確率分布	18
第5章	結果の分析と考察	20
5.1	分散分析	20
5.2	重回帰分析	29
5.3	発話空間のインパルス応答から算出した STI	31
5.4	減衰除去応答から算出した STI	32
5.5	設計用チャートの提案	33
5.6	%聴き取りにくさと単語理解度の比較	34
第6章	おわりに	37
6.1	まとめ	37
6.2	今後の課題	38
	参考文献	39

## 第1章 はじめに

### 1.1 研究背景

オープンプランオフィスに配置されるパーティションで囲われた個人用スペース、銀行商談エリアのパーティション列内の空間、医療施設などに設けられるスタッフ用仮眠室など、音環境に配慮すべき狭小空間は多数あるが、それらの中でも、その音響特性が聴き取りにくさに直結する“携帯電話ブース”の音響設計は重要である。

しかしながら、携帯電話ブースとして設計された吸音の少ない5 m<sup>3</sup>程度の狭小空間で携帯電話を使用すると、通話相手の電話口から再生される音声の聴き取りにくさが著しく増大することが報告されている[1]。従って、十分な会話了解性を確保するための携帯電話ブースの寸法や内装に関する設計指針が必要とされている。

## 1.2 既往研究

矢入ら[1]は、携帯電話ブースとして設けられた狭小空間で携帯電話を使用する際に、通話相手の電話口から再生される音声の聴き取りにくさが著しく増大する問題について、原因究明を行っている。

携帯電話ブースは、一般に、床面積が1~2 m<sup>2</sup>、空間容積が2~5 m<sup>3</sup>の狭小空間で、扉のついた密閉型（写真1）や半開放型（写真2）などがある。



写真1：密閉型携帯電話ブース例



写真2：半開放型携帯電話ブース例

既報[1]によれば、狭小空間において携帯電話ブースで通話する際の聴き取りにくさの増大は、残響成分によるマスキングではなく、音声そのものの変質などの直接的な要因があると考えられる。言い換えれば、反射音成分の中でも、残響感への寄与が比較的少ない部分、すなわち、インパルス応答の極めて初期の部分が影響を及ぼす可能性がある。すなわち、狭小空間に特有の“遅れ時間が短くパワの大きい反射音成分”が携帯電話の情報処理過程に何らかの影響をおよぼす可能性が示唆されている。

「STI」、「男性・女性」、「大空間・狭小空間」、「実音場・携帯電話伝送系経由」で場合分けされた音声から無作為に2つの刺激を並べ、十分に暗騒音の小さい条件のもと、普段携帯電話で通話する際に使う側の耳からのみ音を提示し、聴き取りにくさを評価させる聴感実験において、携帯電話伝送系を経由しない刺激を提示した場合は、残響感と聴き取りにくさに対応がみられるが、携帯電話を経由すると、残響感は大空間のほうが大きいにもかかわらず、聴き取りにくさは狭小空間のほうが大きくなる傾向がみられた。さらに狭小空間において、携帯電話伝送系を経由した刺激を提示した場合、その空間のSTI（音声伝達指標のことで0~1をとりその数値が大きいほど聴き取りやすいと判断する）が高いにもかかわらず、聴き取りにくさが著しく増大することがわかっている。

このことを踏まえ、片桐ら[2]は、どのような空間で発話を行った際にどの程度受話音声の聴き取りにくくなるかを明らかにするために、十分に暗騒音の小さい条件のもと、様々な空間で発話を行った際の受話音声をシミュレートしたものと、空間の影響を取り除いた基準受話音声との比較から聴き取りにくさを評価させる聴感実験を行った。その実験結果を基に聴き取りにくさの予測を試みたが十分な精度を得ることができなかった。その後、矢入ら[3]は、片桐の実験データに対し、発話空間のインパルス応答から減衰を除去した応答を用いてSTIを算出することで、携帯電話音声の聴き取りにくさを高い精度で予測できる可能性を示した。

### 1.3 研究目的

本研究では、“室容積 ( 1.15 m<sup>3</sup>、4.6m<sup>3</sup>、18.4 m<sup>3</sup>、73.6 m<sup>3</sup>、294.4 m<sup>3</sup>、1176.6 m<sup>3</sup> )”“吸音率 ( 0.01、0.02、0.04、0.08、0.16、0.32 )”で場合分けされた音声の聴き取りを行い、音声伝送性能の最も基本的な要件である「単語了解度」の傾向を把握することを目的とする。また、相対評価に基づいて作成された設計チャート[3]に対し、絶対評価による実験結果に基づいた設計チャートを新たに作成し、それらの違いを明確にすることも併せて目的とする。その上で設計チャートの予測精度の検証を行い建築音響設計に有用な指針の構築を行う。

## 第2章 携帯電話音声処理

既報[1]によって、狭小空間において携帯電話で通話する際の聴き取りにくさが著しく増大する現象に、携帯電話の情報処理が大きく影響していることが判明したため、ここで携帯電話の音声処理方法について説明する[3]。

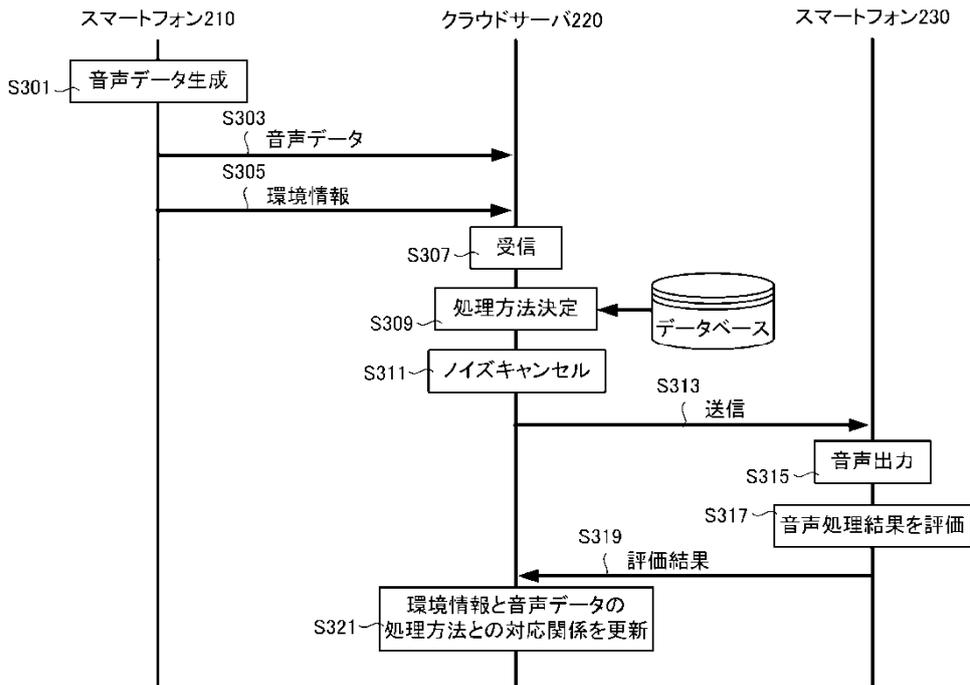


図1；携帯電話の音声処理の概略

携帯電話の音声処理は、音声生成機構の構造的なモデルの知識を利用する音声特有のものである。音源と調音の分離を前提とする方式、すなわち、生成源符号化方式であり、それをしない波形符号化方式と大別される。

一方、音声波形の生成機構は本来生理的な器官の運動であるが、物理的な音響現象としても理解可能である。その生成過程は、音源の生成と調音に分けられる。有声音源は声帯振動に対応するパルス列で近似され、そのピッチ周期が声の高さに、周期の時間的な変化によってアクセントやイントネーションが決まる。無声音源は空気の乱入に対応する白色雑音で近似され、その平均エネルギーが強さに対応する。音源で発生した音波は、舌、唇、顎などの調音器官で形成される音響的な管（声道）の共鳴器官によってフォルマントが形成される。これが調音である。携帯電話の音声情報処理の概略を図1に示す。送信側のマイクロフォンに入力された音声は、線形予測分析によってその標本値間に内存する相関が除去される。ここで固定システムは全極型であり、

その極がフォルマントに対応する。したがって、これらが除去された後の残差には、有声音部では声帯パルスが、無声音部ではランダムノイズが含まれており、それを自己相関処理して得られるピーク周期から、有声か無声の判断、声帯パルス音源のピッチ周期やパワの推定が行われている。線形予測分析の逆、すなわち残差を入力として、標本値間に相関関係を付与していく過程が音声合成であり、合成された信号が受信側の携帯電話から音声となって出力される。予測と合成は逆操作であるから、分解して得られた残差をそのまま入力して与えれば原波形を忠実に再生できる。しかし、それでは情報圧縮にはならないため、様々な簡略化が行われるが、最も情報圧縮に貢献するのは、残差の処理過程にある。声帯パルスが除去された残差には、話し手の個性が含まれており、これを合成に使用しない限り本人の声には戻らない。現在の携帯電話通信では、様々なパターンが事前に登録されたコードブックから、その話し手の残差に最も近いものを選択する手法がとられており、そのようにして合成された音声は、十分に本人の声と認識できるほど高品位である。音声符号化の原理自体は古くから確立されている理論であるが、近年の携帯電話通信を支える音声情報処理の技術躍進には、このコードブックの発展も一役を担っている。

## 第3章 実験方法

どのような空間で発話を行った際にどの程度受話音声聞き取りにくくなるかを明らかにするために、様々な空間で発話を行った際の受話音声をシミュレートしたものを聴いて書き取り、それを4段階の評価基準で評価させる聴取実験を行う。

### 3.1 実験用音声データ条件

#### 3.1.1 実験条件

本研究で考察の対象とする携帯電話ブースの空間条件は以下の通りとする。

- 、室容積（高さはすべて 2.3m で、1.15 m<sup>3</sup>（平面寸法 0.5m × 1m）の部屋、4.6 m<sup>3</sup>（平面寸法 1m × 2m）の部屋、18.4 m<sup>3</sup>（平面寸法 2m × 4m）の部屋、73.6 m<sup>3</sup>（平面寸法 4m × 8m）の部屋、294.4 m<sup>3</sup>（平面寸法 8m × 16m）の部屋、1177.6 m<sup>3</sup>（平面寸法 16m × 32m）の部屋）
- 、壁面の統計入射吸音率（0.01、0.02、0.04、0.08、0.16、0.32）

試験用音源には坂本ら[4]の提案した、親密度により統制された単語音声[5]を採用した。

### 3.1.2 実験用刺激音声データ作成手順

実験に用いた単語は上記に記した親密度の高い単語 80 単語 (図 2) を用いた。この 80 単語のドライソースに市販の幾何音響ソフトウェア (CATT CATT-Acoustic+TUCT) を用いて算出した 3.1 の 、 の各条件のインパルス応答を畳み込むことで、仮想実音場音声を作成する。

作成した音声を Apple iPhone へ入力し、softbank 社の携帯電話回線を通して、別の Apple iPhone へ伝送する。信号を受け取った携帯から再生される音声は、携帯電話ブースの空間条件と携帯電話伝送系の両方の影響を受けた音声であり、これをヘッドホン端子から出力し、デジタルレコーダーにて収録した。この刺激を以下の手順で実験に使用する刺激音声にする。

ここに実験用音源の作成手順を示す。

- 1、親密度の高い単語 (図 2) に 3.1.1 で示した携帯電話ブースの空間条件と携帯電話伝送系の両方の影響を受けた音声 36 音場のインパルス応答を畳み込んで 6 パターンの室容積 × 6 パターンの吸音率 × 80 単語 = 2880 単語の提示刺激を作成する。(3.1.2.参照)
- 2、36 音場に番号をふり、図 3 に示すとおりに数字をランダムに並べる。(図 3 は 36 の音場に番号を振ったものを実験にて提示する順番を示している。)
- 3、1 で作成した音場をランダムに並び変えたものを図 4 の一番左の行に示す。図 4 は各被験者に提示する音場の順序と単語の組み合わせを示したものである。例えば、一人目の被験者には 1 ~ 36 の単語を、二人目の被験者には 2 ~ 37 の単語を三人目の被験者には 3 ~ 38 の単語を聴いて実験を行えるように、刺激データを作成する。

練習用刺激							
1 ボウネン	2 ユウハン	3 スドオリ	4 クギツケ	5 ドウブツ	6 リットル		
7 ウリモノ	8 スクモリ	9 コシアン	10 フユモノ	11 ヨコヅナ	12 グイノミ		
実験1回目用刺激							
1. シナリオ	2 ワキヤク	3 ハンソデ	4 モチゴメ	5 フデバコ	6 クチダシ	7 トビイリ	8 ミズイロ
9 ナツモノ	10 ガリベン	11 ベテラン	12 スイミン	13 スイドウ	14 イヤイヤ	15 リモコン	16 ラクゴカ
17 ニホンゴ	18 ワイシャツ	19 リレキシヨ	20 ウチアゲ	21 マイナス	22 ナニサマ	23 ヒキガネ	24 ヤジウマ
25 ホロヨイ	26 セイジカ	27 ノリモノ	28 ワリコミ	29 ミチバタ	30 ジツヨウ	31 オヒサマ	32 キンピカ
33 プレハブ	34 ヒトゴト	35 マジメサ	36 クチヒゲ	37 ドリブル	38 キレナガ	39 アジワイ	40 カタミチ
実験2回目用刺激							
41 ネットアイ	2 ユウダイ	43 オヒロメ	44 トシゴロ	45 シモヤケ	46 ソラミミ	47 マンキツ	48 アラスジ
49 ザツガク	50 チュウダン	51 ナヅナヅ	52 ヒトゴミ	53 モチニゲ	54 ナツバシヨ	55 アオジソ	56 ザンコク
57 ノビノビ	58 ヨビダシ	59 ピンボケ	60 クラヤミ	61 シャブシャブ	62 デマカセ	63 ツナガリ	64 バクハツ
65 ハツユキ	66 ニワトリ	67 ウラグチ	68 サンピカ	69 シモヤケ	70 ヤネウラ	71 コイビト	72 ラクタン
73 スナハマ	74 チャルメラ	75 アラスジ	76 ガッペイ	77 チュウダン	78 チャクセキ	79 センヨウ	80 ワリカン

図2 実験に用いた親密度の高い単語一覧

1 回目の実験用刺激 (1~40 回目の実験)
4 10 24 28 2 13 19 7 26 31 1 12 17 20 14 30 36 32 35 3 9 16 23 34 6 11 5 21 15 27 8 22 33 29 18 25
2 回目の実験用刺激 (41~80 回目の実験)
29 4 10 13 18 21 26 17 2 33 22 16 9 3 32 11 19 20 8 15 7 30 27 36 34 31 24 1 28 14 23 6 12 5 35 25

図3 ランダムイズ表

		被験者番号									
単語番号 表	音場	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	提示順序	4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
24		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
28		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
13		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
19		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
7		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
26		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
31		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
~~~~~											
27		30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
8		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
22		32	33	34	35	36	37	38	39	40	1
33		33	34	35	36	37	38	39	40	1	2
29		34	35	36	37	38	39	40	1	2	3
18		35	36	37	38	39	40	1	2	3	4
25		36	37	38	39	40	1	2	3	4	5

図4 音表

図4の音表は一部分である。実際の音表は音場番号(行)が1~36、被験者番号(列)が1~40、41~80である。

## 3.2 実験手順

被験者は正常な聴力を有する 20 代男女 40 名を用いる。携帯電話音声に関する日本語単語の聴取実験の被験者には回答用紙を挟んだ野帳をもたせ、ヘッドホンを装着し、十分に暗騒音の低い空間（無響室）において、普段被験者が携帯電話で通話する側の耳からのみ刺激を提示する。無響室の照明はつけたままにし、回答の記入に必要な十分な明るさを与えた。被験者には、実際に評価してもらう実験の前に文脈効果統制を行うために練習として親密度の高い単語 12 単語の書き取りを行った後、本実験を行った。この練習は本実験と全く同じ条件で行った。

本実験は、各被験者に、親密度の高い 36 単語の刺激を提示し少し休憩をとった後、もう一度 36 単語の書き取りを行った。刺激の終了から次の刺激が開始されるまでの間隔を 9 秒として 1 回の試行つまり 36 単語の刺激を聴取するのにかかる時間は、8 分弱である。刺激は、聴こえたとおりにカタカナで書きとらせた。被験者には文面で日本語音節を提示すると教示したが、無意味な連音節に聴こえた場合でも、そのまま聴こえたとおりに書き取るように口答で教示した。単語の書き取りと同時に単語の聴き取りにくさを図 5 の 4 段階で評価してもらった。この実験を被験者 40 名に 2 回ずつ合計 80 回聴取実験を行った。図 6 に教示文、図 7 に解答用紙を示す。尚、実験は佐藤の博士論文[6]に準じて行った。

1	聴き取りにくくはない
2	やや 聴き取りにくい
3	かなり 聴き取りにくい
4	非常に 聴き取りにくい

図 5 4 段階評価指標

この実験は、携帯電話音声に関する日本語単語の聴取実験です。

以下の注意事項に従って回答してください。

- ・カタカナで記入してください。
- ・原則として「キャ」等の小さいヤ、ユ、ヨを含む音節と小さい「ツ」、伸ばす音の「ー」は1マスに書いてください。(基本的には枠の中に1単語書いてもらえば大丈夫です。)例：

マ	ー	ジャ	ン
---	---	----	---

- ・「ズ」と「ヅ」は同じ音なのでどちらを書いてもかまいません。
- ・意味のわからない単語に聴こえても、聴こえたとおりに記入してください。
- ・同時に、その音声の聴き取りにあたって、「聴きとりにくさ」の程度を次の4段階で評価し、その番号を下の例に従って枠内に記入してください。
  - 1、 聴き取りにくくはない
  - 2、 やや 聴き取りにくい
  - 3、 かなり 聴き取りにくい
  - 4、 非常に 聴き取りにくい

例：単語が「マージャン」で評価が「聴き取りにくくはない」とき

マ	ー	ジャ	ン	1
---	---	----	---	---

- ・単語と単語の間隔は9秒です。その間に回答してください。
- ・まず、練習を12回行います。続いて本実験を行います。
- ・実験は30分程度で終了します。
- ・練習後と本実験の40回答後に少し休憩をとります。

「回答いただいた皆様の個人情報や回答内容は、本実験の趣旨・目的以外の目的には使用いたしません。また、分析結果の公表時等において回答者が特定されることはありません。」

## 図6 教示文

年 月 日 氏名

性別 男・女 年齢

※これから音声で提示する日本語音節を次の解答欄の大きいマスに聞こえた通りに記入してください。

また、聞き取りにくさの程度を小さいマスに次の4段階で評価し記入してください。

1. 聞き取りにくくはない
2. やや聞き取りにくい
3. かなり聞き取りにくい
4. 非常に聞き取りにくい

1						21					
2						22					
3						23					
4						24					
5						25					
6						26					
7						27					
8						28					
9						29					
10						30					
11						31					
12						32					
13						33					
14						34					
15						35					
16						36					
17						37					
18						38					
19						39					
20						40					

ご協力ありがとうございました。

関西大学音ゼミ4回生 鈴木裕太

図7 回答用紙

## 第4章 実験結果

### 4.1 実験回答結果

携帯電話音声に関する日本語単語の聴取実験の結果を表1～表2示す。単語了解度の欄は、単語の書き取りの不正解率  $(1 - (\text{正解した数}) \div 80 \times 100)$  を示す。聴き取りにくさの欄は、 $(1 - (1 \text{ と答えた数}) \div 80 \times 100)$  の百分率で示す。

表1 1～18の音場の単語理解度・聴き取りにくさ

		吸音率	室容積	単語理解度	%聴き取りにくさ
音場番号	1	0.01	1.15	55	96.25
	2	0.01	4.6	35	91.25
	3	0.01	18.4	23.75	80
	4	0.01	73.6	13.75	63.75
	5	0.01	294.4	7.5	30
	6	0.01	1177.6	6.25	22.5
	7	0.02	1.15	35	91.25
	8	0.02	4.6	25	82.5
	9	0.02	18.4	17.5	81.25
	10	0.02	73.6	6.25	50
	11	0.02	294.4	6.25	21.25
	12	0.02	1177.6	2.5	13.75
	13	0.04	1.15	17.5	92.5
	14	0.04	4.6	22.5	81.25
	15	0.04	18.4	12.5	65
	16	0.04	73.6	10	45
	17	0.04	294.4	3.75	17.5
	18	0.04	1177.6	2.5	12.5

表2 19～36の音場の単語理解度・聴き取りにくさ

		吸音率	室容積	単語理解度	%聴き取りにくさ
音場番号	19	0.08	1.15	11.25	75
	20	0.08	4.6	7.5	61.25
	21	0.08	18.4	7.5	50
	22	0.08	73.6	6.25	35
	23	0.08	294.4	3.75	35
	24	0.08	1177.6	1.25	15
	25	0.16	1.15	6.25	57.5
	26	0.16	4.6	6.25	65
	27	0.16	18.4	6.25	46.25
	28	0.16	73.6	5	43.75
	29	0.16	294.4	5	25
	30	0.16	1177.6	3.75	12.5
	31	0.32	1.15	6.25	51.25
	32	0.32	4.6	6.25	53.75
	33	0.32	18.4	2.5	37.5
	34	0.32	73.6	6.25	32.5
	35	0.32	294.4	5	30
36	0.32	1177.6	0	18.75	

以上の結果より、吸音率が低く、室容積が小さい場合が一番単語理解度、聴き取りにくさの結果が低い傾向にあり、吸音率が高く、室容積が大きい場合は高い傾向にあると思われる。

## 4.2 確率分布

表3～表4に聴き取りにくさの回答の確率分布を示す。例えば、表1の一番上の結果が示すことは、吸音率0.01室容積1.15 m<sup>3</sup> (0.5m×1m×2.3m)音場に対して、1,2,3,4のどの回答がどのくらい割合を占めるかを示している。

表3 確立分布1～18音場

				確率分布			
				カテゴリ			
		吸音率	室容積	1	2	3	4
音場番号	1	0.01	1.15	0.0375	0.1375	0.25	0.575
	2	0.01	4.6	0.0875	0.3625	0.2875	0.2625
	3	0.01	18.4	0.2	0.4	0.2375	0.1625
	4	0.01	73.6	0.3625	0.45	0.1375	0.05
	5	0.01	294.4	0.7	0.275	0	0.025
	6	0.01	1177.6	0.775	0.1625	0.05	0.0125
	7	0.02	1.15	0.0875	0.275	0.25	0.3875
	8	0.02	4.6	0.175	0.2	0.3875	0.2375
	9	0.02	18.4	0.1875	0.475	0.2375	0.1
	10	0.02	73.6	0.5	0.3625	0.125	0.0125
	11	0.02	294.4	0.7875	0.1125	0.0625	0.0375
	12	0.02	1177.6	0.8625	0.125	0.0125	0
	13	0.04	1.15	0.075	0.3125	0.3875	0.225
	14	0.04	4.6	0.1875	0.425	0.25	0.1375
	15	0.04	18.4	0.35	0.4625	0.1125	0.075
	16	0.04	73.6	0.55	0.2875	0.15	0.0125
	17	0.04	294.4	0.825	0.125	0.05	0
	18	0.04	1177.6	0.875	0.0875	0.0125	0.025

表4 確率分布 19～36の音場

				確率分布			
				カテゴリ			
		吸音率	室容積	1	2	3	4
音場番号	19	0.08	1.15	0.25	0.375	0.275	0.1
	20	0.08	4.6	0.3875	0.3	0.225	0.0875
	21	0.08	18.4	0.5	0.3875	0.075	0.0375
	22	0.08	73.6	0.65	0.2125	0.1125	0.025
	23	0.08	294.4	0.65	0.25	0.0875	0.0125
	24	0.08	1177.6	0.85	0.125	0.025	0
	25	0.16	1.15	0.425	0.3375	0.1625	0.075
	26	0.16	4.6	0.35	0.475	0.1375	0.0375
	27	0.16	18.4	0.5375	0.35	0.0625	0.05
	28	0.16	73.6	0.5625	0.3375	0.0875	0.0125
	29	0.16	294.4	0.75	0.1875	0.05	0.0125
	30	0.16	1177.6	0.875	0.0875	0.0375	0
	31	0.32	1.15	0.4875	0.35	0.1375	0.025
	32	0.32	4.6	0.4625	0.4	0.125	0.0125
	33	0.32	18.4	0.625	0.275	0.0875	0.0125
	34	0.32	73.6	0.675	0.225	0.075	0.025
35	0.32	294.4	0.7	0.2625	0.025	0.0125	
36	0.32	1177.6	0.8125	0.1375	0.05	0	

## 第5章 結果の分析と考察

### 5.1 分散分析

実験において、評価に用いた指標（1.聴き取りにくくはない、2.やや聴き取りにくい、3.かなり聴き取りにくい、4.非常に聴き取りにくい）はあくまで実験の中での記号で、その評価間の距離に意味付けがされていないため、このままでは統計的な分析を行うことができない（聴き取りにくさの評価は、各被験者のものさしで判断しているため、個人差がある。聴き取りにくさにどれほどの幅があれば、この数値にするという判断基準が異なるため）。そのために系列カテゴリー法を用いて、“1,2,3,4”の評価を距離尺度（Z値）に変換する。

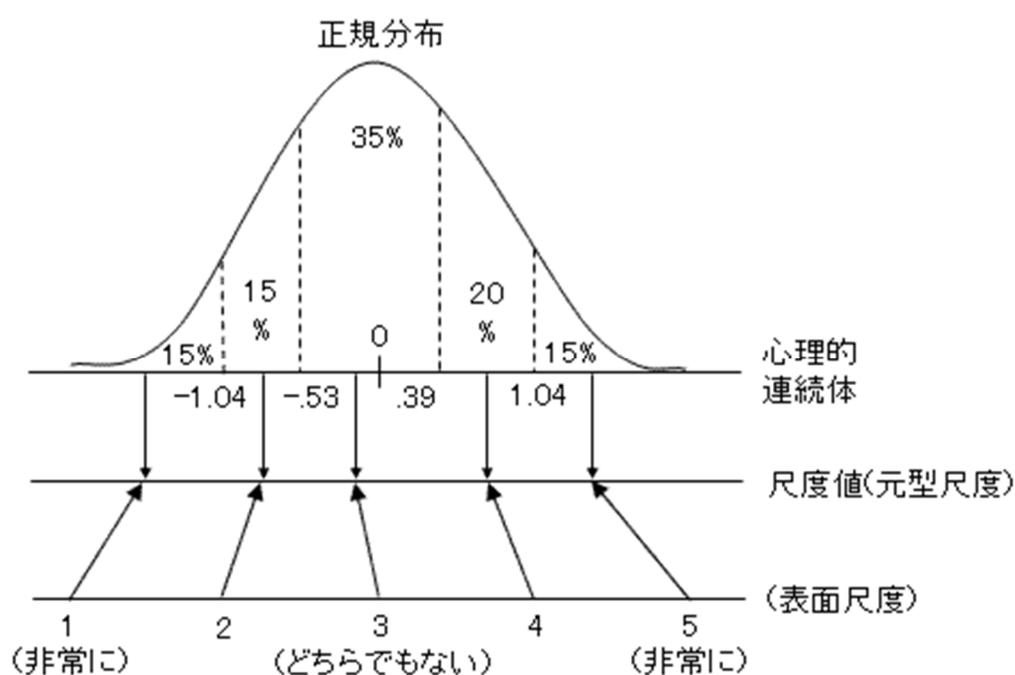


図8 正規分布図

図8において、確率分布15%や35%と書いてあり曲線と点線で囲まれた領域を“カテゴリー”と呼び、Z値は“平均からそれぞれのカテゴリーの中心までの距離”である。Z=0とは、評価されたカテゴリー全体の確率分布の平均であることを示す。

次に、Z値の算出方法を、[7]から引用した、図9を用いて説明する。

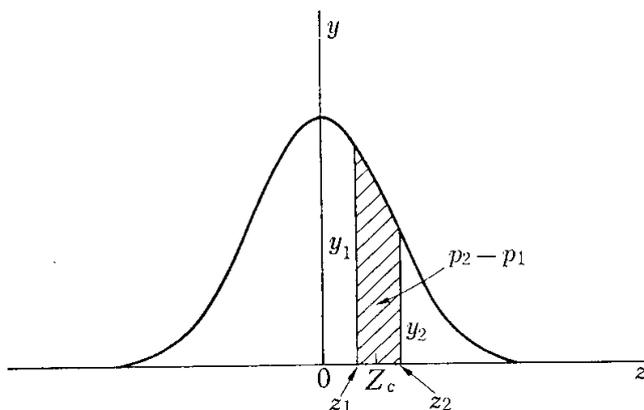


図9：準正規分布とカテゴリーの対応

図9における、 $Z_c$ が求めたいZ値であり、 $y$ や $p$ は以下の意味を持つ。

$y_1$ ：カテゴリー下限の縦座標

$y_2$ ：カテゴリー上限の縦座標

$p_1$ ：カテゴリー下限より下と判断された比率（ $z_1$ より左側で曲線に囲まれた部分の面積）

$p_2$ ：カテゴリー上限より下と判断された比率（ $z_2$ より左側で曲線に囲まれた部分の面積）

これらをもとに、次式よりZ値を算出することができる。

$$Z = (y_1 - y_2) / (p_1 - p_2)$$

この式を用いて、実験で1（聴き取りにくくはない）と回答されたカテゴリーの代表値を0、4（非常に聴き取りにくい）と回答されたカテゴリーの代表値を1として、尺度全体が0～1の範囲に納まるように数値を調整し、それぞれの距離尺度を示した。それぞれの評価のZ値の境界値、代表値を算出した結果を表5、図10に示す。

表5：系列カテゴリー法により算出されたZ値

評価	1	2	3	4
Z値(代表値)	0	0.452121	0.740574	1
評価	1～2	2～3	3～4	
Z値(境界値)	0.294174	0.632864	0.848038	

図 10 は Z 値（縦軸）と評価（横軸）の関係を図示したものである。

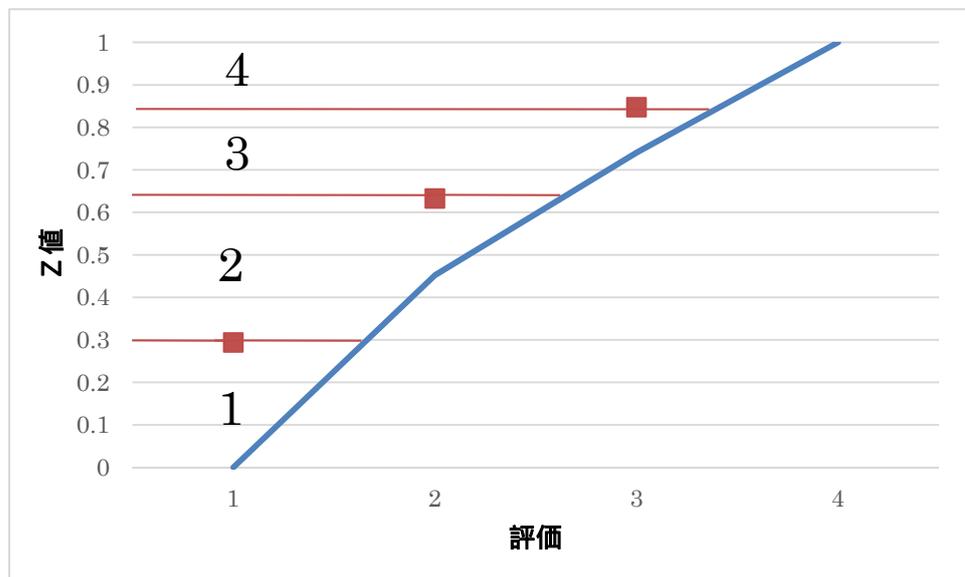


図 10 : Z 値と評価表の数値の関係性

各音場について、表 3～4 の確率分布に各カテゴリーの代表値をかけ、それを足したものを scale of listening difficulty とする。

系列カテゴリー法で算出したZ値をもとに、3元配置分散分析を行う。3元とは、“吸音率”“室容積”“今年のデータとの比較(相対評価と絶対評価の比較)”の3要素であり、分散分析を行うことによりどの要素が聴き取りにくさの差に、影響するのかを明らかにする。3元配置分散分析の結果を表10に示す。(表6に記入してあるa,rは、a(今年度の実験における絶対評価)、r(昨年度の実験における相対評価)である。)

表6：3元配置分散分析結果

分散分析表						**：1%有意 *：5%有意
因子	TypeⅢ平方和	自由度	平均平方	F値	P値	判定
吸音率	159.7940	5	31.9588	482.7893	0.0000	**
室容積	111.3101	5	22.2620	336.3037	0.0000	**
a or r	28.7635	1	28.7635	434.5194	0.0000	**
吸音率 * 室容積	21.3182	25	0.8527	12.8818	0.0000	**
吸音率 * a or r	41.6822	5	8.3364	125.9352	0.0000	**
室容積 * a or r	6.0157	5	1.2031	18.1753	0.0000	**
吸音率 * 室容積 * a or r	5.4956	25	0.2198	3.3208	0.0000	**
誤差	376.5239	5688	0.0662			
全体	750.9032	5759				

表6の判定の欄に\*または\*\*が付いている因子は、その因子が変化した場合、聴き取りにくさの評価の平均値に有意な差があったことを示す。従って、すべての要素に有意な差があると判定された。また、どの要素を組み合わせても有意な差があり交互作用があることを示す。交互作用があるということは、例をあげると“室容積が小さい部屋”と“室容積が大きい部屋”において、吸音率がある一定値上がった際の聴き取りにくさの変化の幅に違いがみられることを示している。図11、図12に分散分析による吸音率、室容積の変化における scale of listening difficulty の変化を示す。

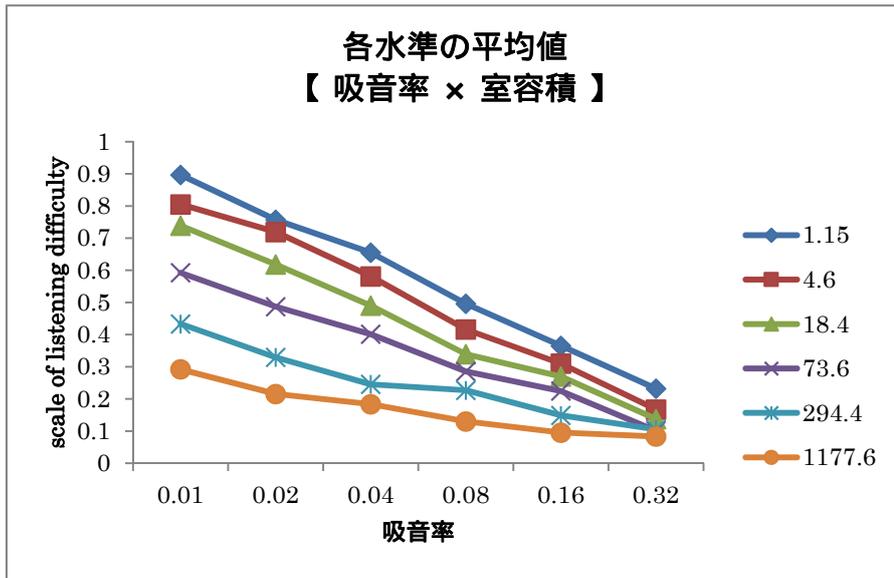


図 11：分散分析による吸音率の変化における scale of listening difficulty の変化

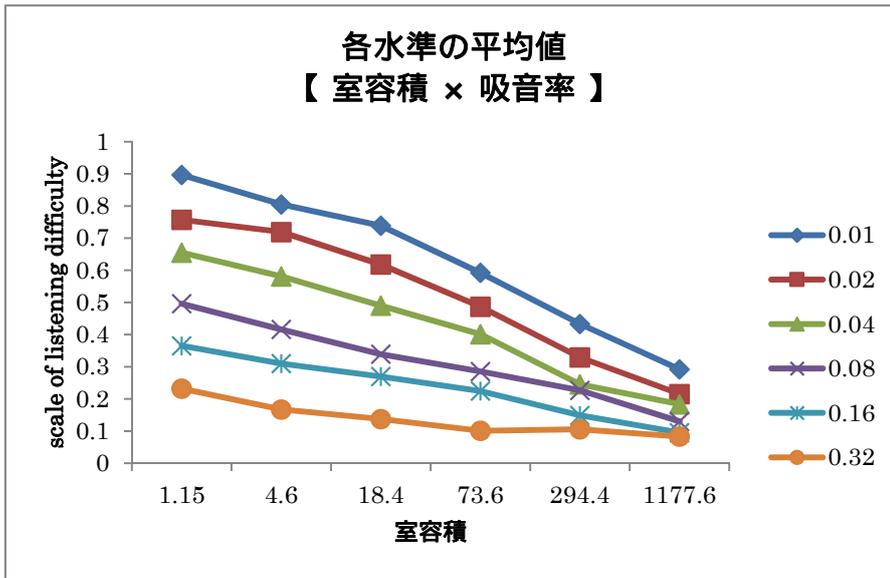


図 12：分散分析による室容積の変化における scale of listening difficulty の変化

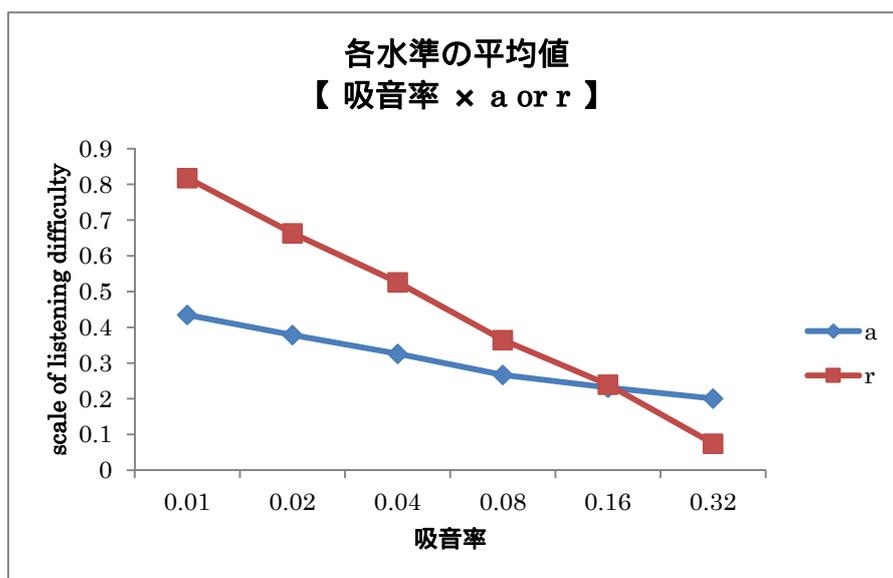


図 13：分散分析による吸音率の昨年と今年の比較

図 13 に関して、昨年度は吸音率が小さくなるにつれて scale of listening difficulty が増大しているが、今年度の結果としては、吸音率が小さくなったとしても、scale of listening difficulty にはあまり変化が見られなかった。昨年と今年でここまで吸音率の傾きに違いがみられた要因としては、昨年度は文章での聴き取りにくさの実験を行ったのに対し、今年度は、単語での聴き取りにくさの評価を行ったため、刺激の提示時間に大きな差があり、その差が時間的なマスキングの影響の差となり、このような結果になったのだと思われる。

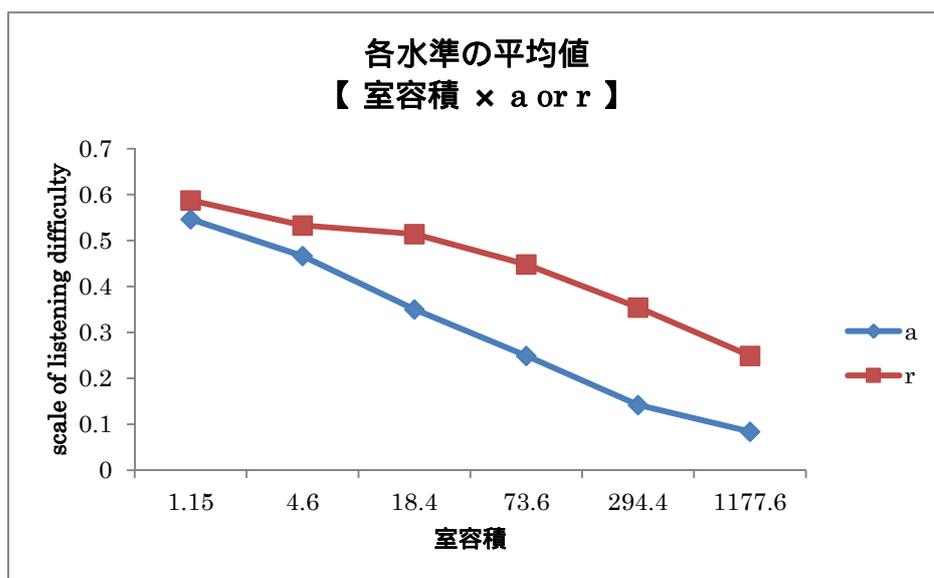


図 14：分散分析による室容積の昨年と今年の比較

図 14 に関して、室容積に関しては昨年、今年の違いはあまりみられなかった。

図 15、図 16 に昨年度と今年度の吸音率と室容積をパラメーターとした scale of listening difficulty の比較グラフを示す。

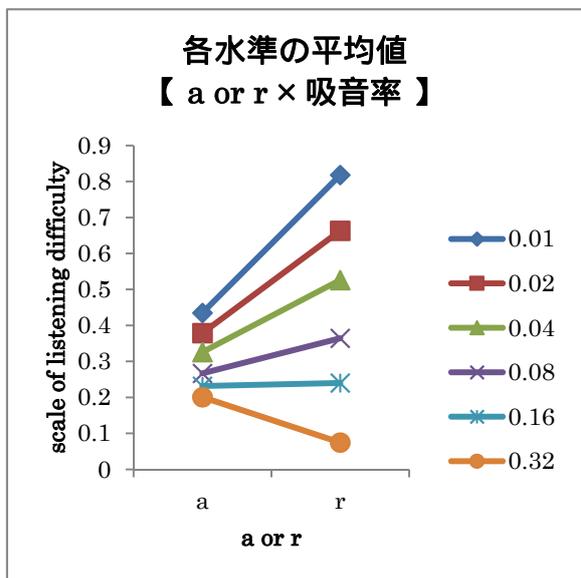


図 15：吸音率における昨年度と今年度の比較

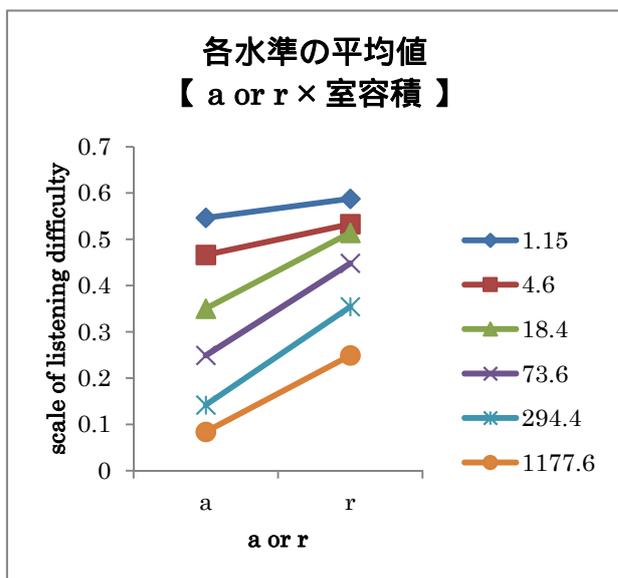


図 16：室容積における昨年度と今年度の比較

図 16 より、室容積に関しては、ほぼ昨年度の結果を平行移動させた値になっていて、そこまで違いがみられない。しかし、図 15 の吸音率については、昨年度はほぼフルレンジでプロットされているのに対し、今年度は、0.2～0.45 の狭いレンジでしかプロットされていない。これは昨年度の文章の聴き取りに対して、今年度の単語の聴き取りにという提示時間の差が時間的なマスクングの影響に差が生まれたのだと思われる。

## 5.2 重回帰分析

次に重回帰分析による観測値と予測値の比較を行う。

%聴き取りにくさを目的変数、吸音率と室容積を説明変数として重回帰分析を行った。

その結果を表7に示す。

表7： 重回帰分析結果

結果							
回帰式の精度							
重相関係数		決定係数					
R	修正 R	R2 乗	修正 R2 乗	ダービンワトソン比	AIC		
0.9859	0.9845	0.9719	0.9693	2.0782	-236.7249		
回帰式に含まれる変数 (偏回帰係数・信頼区 間等)							
				偏回帰係数の有 意性の検定			
変 数	偏回帰係数	標準誤差	標準偏回帰 係数	F 値	t 値	P 値	判 定
対数吸音率	-0.3610	0.0209	-0.9308	297.4539	-17.2469	0.0000	**
対数室容積	0.0004	0.0151	0.0022	0.0008	0.0280	0.9779	
対数 積	0.1292	0.0112	1.0393	133.7034	11.5630	0.0000	**
定数項	0.1078	0.0282		14.5727	3.8174	0.0006	**
偏回帰係数の 95%信頼区間							
下限値		上限値		単相関	偏相関	トレランス	VIF
-0.4036		-0.3183		-0.4092	-0.9502	0.3013	3.3192
-0.0303		0.0311		-0.8290	0.0049	0.1452	6.8874
0.1064		0.1519		0.5704	0.8983	0.1086	9.2066
0.0503		0.1653					

重回帰分析の数式  $y = x_1 \log a_1 + x_2 \log a_2 + x_3 \log a_1 \times \log a_2 + b$

ここで、 $y$  : %聴きとりにくさ

$a_1$  : 吸音率 (変数 : 0.01 ~ 0.32 (倍率は $2^{1/6}$ ))

$x_1$  : 対数吸音率の偏回帰係数

$a_2$  : 室容積 (1.15 m<sup>3</sup> ~ 1177.6 m<sup>3</sup> (倍率は $2^{1/6}$ ))

$x_2$  : 対数室容積の偏回帰係数

$x_3$  : 対数積の偏回帰係数

$b$  : 定数項

表 7 より決定係数は 0.9719 であり、回帰精度は非常に高いといえる。

### 5.3 発話空間のインパルス応答から算出した STI

発話空間のインパルス応答から算出した STI と scale of listening difficulty の関係を図 17 に示す。STI の算出においては、音源特性を AIJES[2]に示されているスピーチ特性で近似し、暗騒音の影響は考慮しない。図 17 に示した回帰直線は、実空間インパルス応答から求めた STI を説明変数とする、心理尺度値、 $Z_j$ (被験者の反応分布の平均値)の推定値、 $\mu_j$ である。

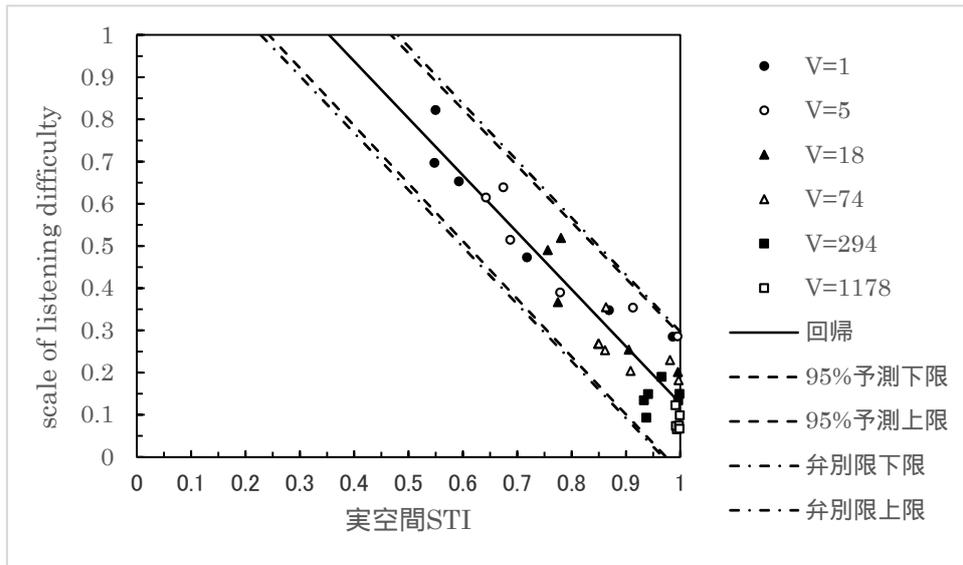


図 17：発話空間の IR から算出した STI と scale of listening difficulty の関係

図より、各種シンボルが尺度値、実線はその回帰直線、破線は 95% 予測区間を示している。一点鎖線は Tukey の HSD ( $< 0.05$ ) の範囲 ( $\pm 0.13$ ) を示したものであり、弁別閾を表す。回帰直線の決定係数 ( $R^2 = 0.88$ ) は比較的高く、STI と聴き取りにくさの間には高い負の相関が見られ 95% 予測区間が HSD の範囲に納まっている。発話空間容積が小さくなるにつれて STI が小さく (聴き取りにくく) なり、発話空間容積が大きくなるにつれて、STI は大きく (聴き取りやすくなる) なる。

## 5.4 減衰除去応答から算出した STI

携帯電話のダイナミックレンジは概ね 48dB (8bit) である。そこで STI の算出にあたっては、余裕を見て、Schroeder の減衰曲線が直接音レベルから 30dB 減衰するまでの時間で応答を打ち切る。また、音源特性は、携帯電話の伝送帯域が 3.4kHz で高域遮断されることから、4kHz,8kHz の 2 帯域の音声レベルを 0dB に設定する。算出方法としては Bradley[8]の方法で行い、この方法を用いると、減衰除去 STI を算出すると STI の上限が 0.75 となる。図 18 に示した回帰直線は、減衰除去インパルス応答から求めた STI を説明変数とする、心理尺度値、 $Z_j$ (被験者の反応分布の平均値)の推定値、 $\mu_j$ である。

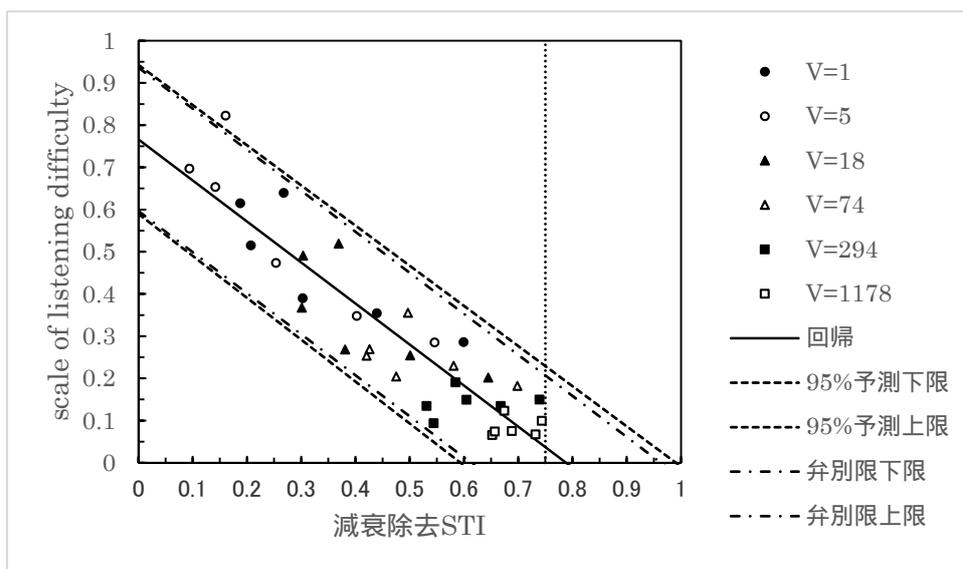


図 18 : 減衰除去応答から算出した STI と scale of listening difficulty の関係

発話空間のインパルス応答から直接算出した STI の場合と比べ、図 18 は、決定係数 ( $R^2 = 0.84$ ) だけをみると図 17 より悪い結果が出ている。しかし、発話空間容積ごとの傾きは概ね並行であり、空間容積が大きい場合でも、STI が尺度性を持つという点では図 17 より良い結果と言える。すなわち、図 17 では STI が 1 の時に scale of listening difficulty のプロットが 0.05 ~ 0.3 にばらついていたが、図 18 では高い STI でもそれほどばらついていない。

しかしながら、両図ともに 95% 予測区間の中にプロットが納まっているので、いずれの図を用いても STI の携帯電話音声の聴き取りにくさを高い精度で予測できるものと思われる。

## 5.5 設計用チャートの提案

本実験で用いた評定尺度法は、そのカテゴリが持つ意味によって、段階的な絶対評価が可能であるが、カテゴリ自体が幅を持つため、設計目標に掲げたカテゴリのどの辺りに目標値を定めればいいのかという判断が難しい。そこで、以下に示す表記法を引用する[2]。系列カテゴリ法の仮定から、本実験で設定したカテゴリの境界は、各被験者の判断軸上の普遍の位置にあるとし、被験者の感度や反応の揺らぎが、等分散の正規分布に従うと仮定すると、各カテゴリの境界値、 $C_b$ (表5)と $\mu_j$ の間の標準化距離、 $Z_j$ は次式で定義される。

$$Z_j = \frac{\mu_j - C_b}{\sigma_0}$$

ただし、 $\sigma_0$ は、被験者の応答(標本)から推定した母集団の反応分布の標準偏差である。境界値ごとに算出した聞き取りにくさの確率曲線を、減衰除去インパルス応答から求めた STI の関数として図 19 に示す。

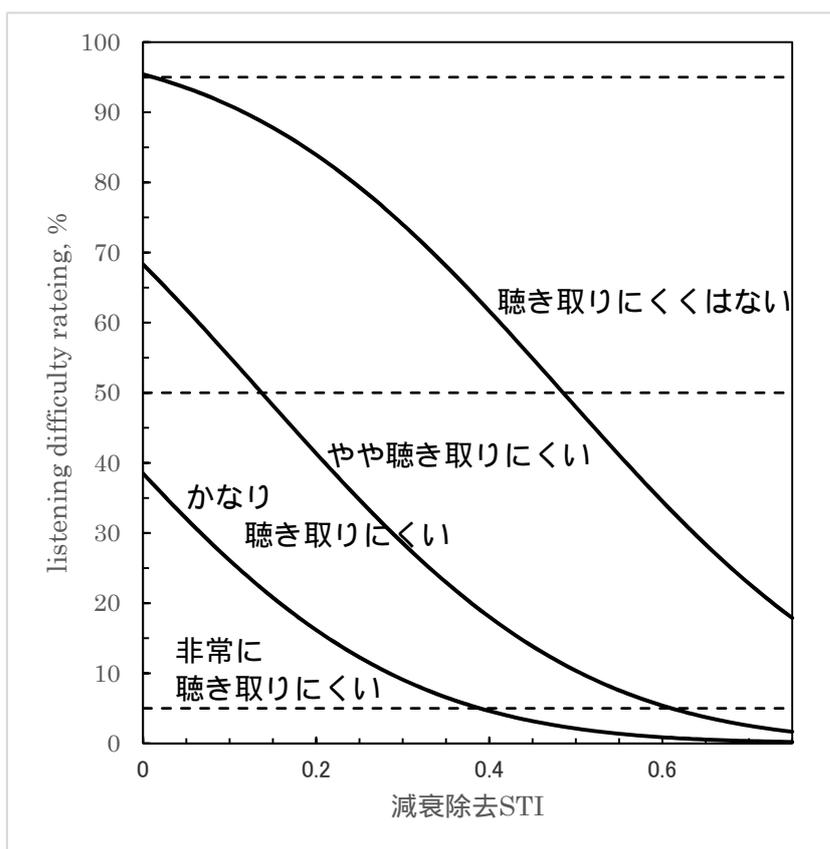


図 19：境界値ごとに算出した聞き取りにくさの確率曲線

このチャートを使用すれば、たとえば、50%以上の人々が「聞き取りにくくはない」というカテゴリに属する状態を目標に掲げる場合は、STI の設計目標値を 0.46 以上にすればよいということが一目でわかる。

## 5.6 %聞き取りにくさと単語了解度の比較

全回答をまとめ単語を正しく聞き取れた割合である単語了解度と、森本ら[9]の方法に従って%聞き取りにくさを求めた。求めた単語了解度と%聞き取りにくさを使用し、実空間 STI と減衰除去 STI を横軸とした単語了解度と%聞き取りにくさの結果（単語了解度は、100-単語了解度、%聞き取りにくさは、100-聞き取りにくくはないと答えた割合で求める。）を図 20、図 21 に示す。

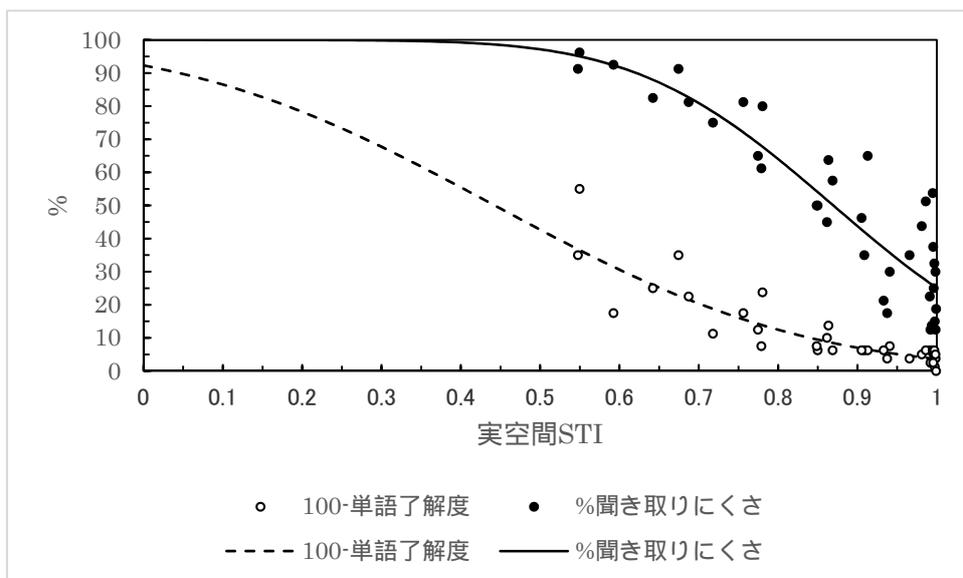


図 20：実空間 STI における単語了解度と%聞き取りにくさの比較

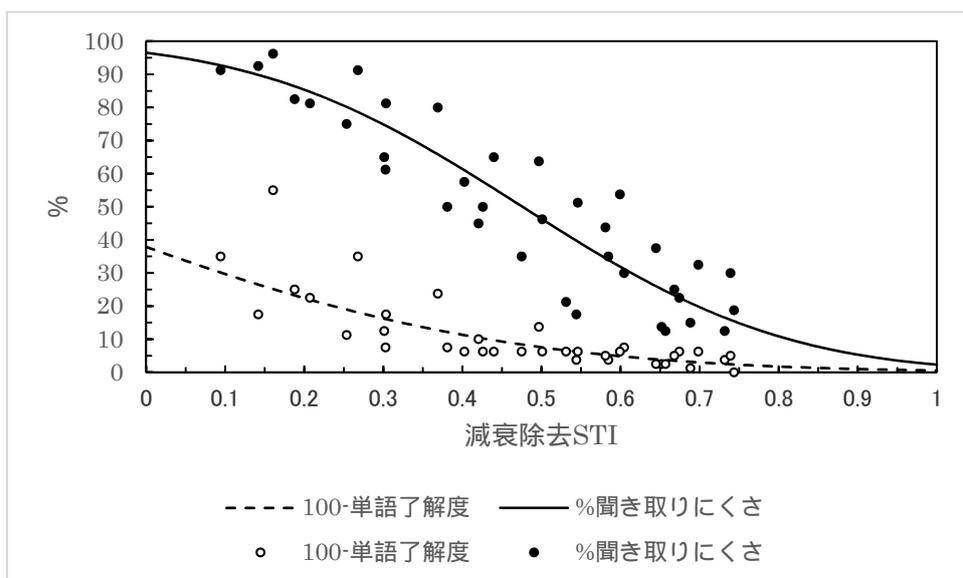


図 21：減衰除去 STI における単語了解度と%聞き取りにくさの比較

図 20、図 21 より、図 20 では、STI が高い値のときにも%聴き取りにくさの値が高く、0.5 の時点ではほぼ 100%となっており、単語了解度のほうも STI が 0.5 の時点で 60%を超えている。一方、図 21 は、STI が高い値のときに%聴き取りにくさはそこまで高くなく STI が 0.1 のときにほぼ 100%となっている。単語了解度も、STI が高いときには正解率が高く、STI が低い値のときでも正解率が 40%とそこまで高い値をとっていない。グラフを見比べてみても図 20 は、STI が高い値のところプロットが集中しているのに対し、図 21 は、広範囲にプロットされているので尺度性がある。

次に%聞き取りにくさと単語了解度の関係を図 22 に示す。

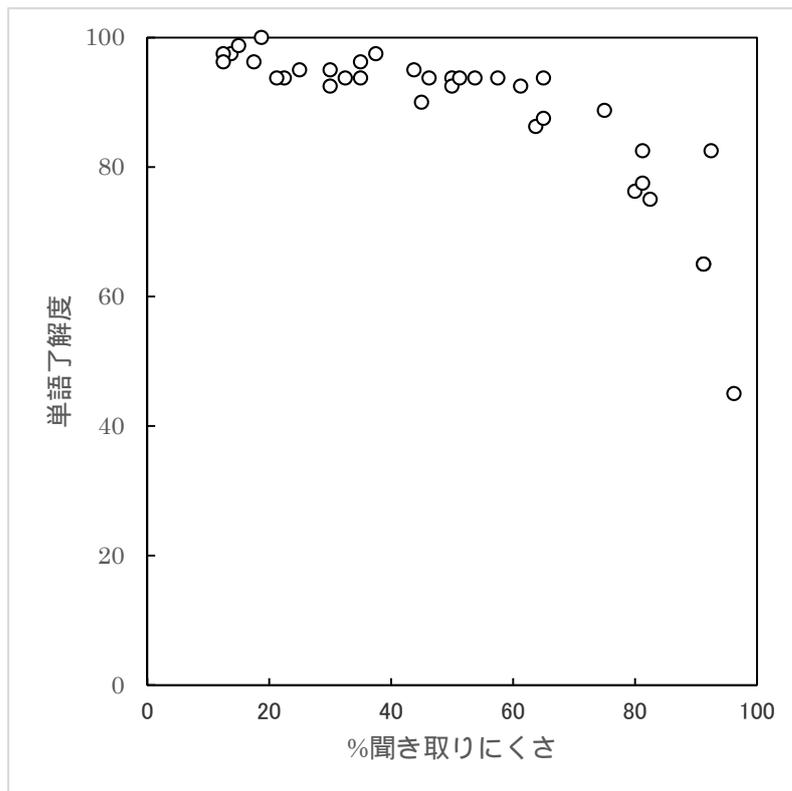


図 22 : %聞き取りにくさと単語了解度関係

図 22 より、単語了解度は、%聞き取りにくさが増大するにつれて減少する。しかし単語了解度の変動率は、100% ~ 45%の 55%程度しかなく、%聞き取りにくさの12% ~ 96%で大きな範囲で変動する。単語了解度は親密度の高い単語を使用したために、ある程度聞き取れば回答することができ、そこまでレンジが広がらなく、%聞き取りにくさは基本単語の回答をすることができれば、1(聞き取りにくくはない)と回答するが、少しでも聞き取りにくいまたは、単語を回答できなければ4(非常に聞き取りにくい)と回答するためレンジが広がったのだと思われる。

## 第6章 おわりに

### 6.1 まとめ

本研究では“室容積”と“吸音率”で場合分けされた音声による聴き取りにくさと単語理解度を評価する携帯電話音声に関する主観実験を行い、それぞれの空間条件に対応する聴き取りにくさ、単語理解度を算出した。今後携帯電話ブースを設計する際に利用できる評価指標を提案することを目標に様々な分析を行い、昨年度との比較を行った。その結果、昨年度は、吸音率、室容積の両方の要素が聴き取りにくさに寄与し交互作用が高かったが、今年度は聴き取りにくさは室容積にはあまり影響を受けず、吸音率の変化のみに伴い増大する結果が得られた。その理由として、昨年度は提示刺激を文章で行ったのに対し、今年度は提示刺激を単語で行ったために、残響感による反射音やマスキングの影響をあまり受けなかったと思われる。しかしながら設計指針という意味では、図 17～22 で示した設計チャートは十分な精度で聴き取りにくさを予測することができ、有効に利用することが可能と思われる。

## 6.2 今後の課題

本研究では、聴き取りにくさと物理指標を用いて、図 17～22 で示した設計チャートを算出し、昨年のもとのとの比較を行った。設計チャートを見ると聴き取りにくさを高い精度で予測することが可能だと思われるが、昨年と提示刺激の種類（昨年度は文章、今年度は単語）を変えたために残響成分に差が出てしまった。今後は、文章による聴き取りにくさの評価を行う実験を行い、その結果をもとに分析や予測を行う必要がある。

## 参考文献

- [1]矢入幹記,「狭小空間の音響設計に向けて～携帯電話ブースによる聴き取りにくさ～」,日本音響学会建築音響研究委員会,建築音響研究会資料資料番号 AA2013-19, 2013年5月30日
- [2]片桐領太,“狭小空間での携帯電話による音声伝送性能の評価”,卒業論文(関西大学),2013
- [3]矢入幹記,豊田政弘,「携帯電話音声の聴き取りにくさにおよぼす建築空間の影響:音声伝送性能評価指標による予測」,日本音響学会建築音響研究委員会,建築音響研究会資料; AA2014-36,東京,2014
- [4]坂本修一,鈴木陽一,天野成昭,小沢賢司,近藤公久,曾根敏夫,“親密度と音韻バランスを考慮した単語了解度試験用リストの構築,”日本音響学会誌 54,842-849(1998)
- [5]天野成昭,近藤公久,日本語の語彙特性(三省堂,東京,1999)
- [6]佐藤逸人,「ユニバーサルデザインを考慮した音声伝送性能に関する研究」,博士論文-工学 // 乙 2977 // //2008-01 //2009-06-30
- [7]西村武,「テレビジョン」31巻5号,1977年,p369～p377,「主観評価の理論と実際」
- [8] J.S.Bradley,“Speech intelligibility studies in classroom,”J,Acoust.Soc.Am.80,846-854(1986).
- [9]M.Kobayasi,M.Moromoto,Hi.Sato,and Ha.Sato,“Optimum speech level to minimize listening difficulty in public spaces,” J.Acoust.Soc.Am.121,251-256(2007)

## 謝辞

研究を進めるにあたり、お忙しい中数々のご指導、ご鞭撻を頂いた豊田政弘先生、矢入幹記様に厚く御礼申し上げます。また、研究に協力して頂いた、関西大学の学生、また建築環境工学第一研究室の皆様にも大変お世話になりました。心から御礼申し上げます。